

玉米收获机割台砍劈式茎秆粉碎装置设计与试验

王立军 张志恒 刘天华 王奕娇 贾飞 姜佳旭

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 在保证玉米秸秆粉碎长度合格率的前提下,为了增加茎秆的破碎程度、加快秸秆还田后的分解速率,基于玉米茎秆的力学特性,设计了一种可以安装在玉米收获机割台下方的茎秆粉碎装置。通过理论分析得到影响粉碎效果的作业参数和结构参数,选取茎秆粉碎装置的刀轴转速、安装角、刀尖倾角为试验因素,以秸秆粉碎长度合格率和秸秆破碎率作为评价指标,进行了单因素及二次正交旋转组合试验。采用响应曲面法对试验结果进行分析,运用 Design-Expert 软件的多目标优化算法进行参数优化。结果表明:各因素对秸秆粉碎长度合格率的影响程度由大到小依次为:刀轴转速、刀尖倾角、安装角,各因素对秸秆破碎率的影响程度由大到小依次为:刀轴转速、安装角、刀尖倾角;该装置最优参数组合为:刀轴转速 1 090 r/min、安装角 41°、刀尖倾角 83°。田间验证试验表明,秸秆粉碎长度合格率和秸秆破碎率分别达到 90.21% 和 85.78%,远高于目前甩刀式茎秆粉碎装置的作业效果。

关键词: 玉米联合收获机; 茎秆力学特性; 粉碎装置; 砍劈式

中图分类号: S225.31 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)07-0109-09 OSID: 

Design and Experiment of Device for Chopping Stalk of Header of Maize Harvester

WANG Lijun ZHANG Zhiheng LIU Tianhua WANG Yijiao JIA Fei JIANG Jiaxu

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: During the maize harvest, to increase the percentage of qualified length of stalk chopped and degree of stalk breakage to accelerate the decomposition rate after the straw being returned to the field, the device for chopping stalk was designed based on the mechanical properties of maize stalks and would make it be installed under the header of maize harvester. The working parameters and structural parameters affecting the working performance were obtained through the theoretical analysis. The rotational speed of shaft of chopper, fixed angle and tip angle of the blades were selected as the experimental factors. The percentage of the qualified length of stalk chopped and the percentage of the stalk broken were used as evaluation indexes. The quadratic orthogonal rotational-combinational tests were conducted. The experimental data were analyzed by the response surface method, and the multi-objective optimization algorithm of Design-Expert software was used to optimize the parameters. The results showed that the rotational speed of shaft of chopper had the most significant effect on the percentage of qualified length of stalk chopped, and then the tip angle, finally the fixed angle, and the rotational speed of shaft of chopper had the most significant effect on the percentage of the stalk broken, and then the fixed angle, finally the tip angle. The optimized parameters of the device for chopping stalk were the rotational speed of shaft of chopper of 1 090 r/min, the fixed angle of 41°, and the tip angle of 83°. The stalk-chopping device was produced. The field tests were carried out. The percentage of the qualified length of stalk chopped and the percentage of the stalk broken were 90.21% and 85.78%, respectively. The performance of the device for chopping stalk in working was much higher than that of the current chopper device below the header of harvester.

Key words: maize combine harvester; mechanical properties of maize stalk; chopping device; chopper

0 引言

我国东北地区冬季封冻期长,土壤积温较低,秸秆还田后分解速度慢,影响了还田效果^[1]。为了提高玉米秸秆还田后的分解效率,在进行粉碎作业时要把秸秆尽可能打碎,以增大茎秆破碎后的表面积^[2]。目前,玉米秸秆还田时的粉碎程度较低,因此设计一种可以提高茎秆粉碎程度的茎秆粉碎装置具有重要意义。

研究人员对农作物的切割特性及秸秆粉碎装置已进行了许多研究^[2-10]。现有玉米收获机割台下方多为甩刀式茎秆粉碎装置,结构简单但作业效果不佳。为了使玉米收获机作业后的玉米秸秆粉碎长度合格率符合国家标准,以及增大玉米秸秆的破碎率,本文设计一种符合玉米茎秆力学特性的砍劈式茎秆粉碎装置,通过单因素试验和二次正交旋转组合台架试验对试验因素进行分析优化,并通过田间试验验证茎秆粉碎装置的作业性能。

1 茎秆粉碎装置结构

砍劈式茎秆粉碎装置与玉米收获机割台配合使用,安装在收获机割台下方。在收获机工作时,玉米茎秆进入分禾器后在拨禾链的作用力下被拉茎辊夹持,此时茎秆进入粉碎装置的工作范围,在转动的拉茎辊作用下向下运动,刀尖在穿透茎秆的过程中将茎秆局部劈裂,同时刀片旋转使受打击纤维与待受打击纤维间相互撕裂,直至茎秆低于茎秆粉碎装置的工作平面。砍劈式茎秆粉碎装置主要包括刀轴、刀片、刀臂、固定圆盘等,如图 1 所示。为了使刀片更容易击穿茎秆外皮进入到茎秆内部,且保证对茎秆的劈裂使内穗充分暴露,增大茎秆段与土壤的接触面积以提高其降解速率,将刀形设计为三角形。鉴于当前玉米收获机割台下方每个刀轴的圆周方向上安装两把甩刀,砍劈式茎秆粉碎装置同样对称布置两把带有刀片的刀臂。固定圆盘上的弧形孔用以调节刀臂的安装角,调节范围为 $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。为了防止刀片松动,在刀片上留出沉槽,深度 $e=3\text{ mm}$,沉槽宽度与刀臂尺寸一致,为 30 mm 。

1.1 刀片间隙设计

在刀片对茎秆打击时,茎秆沿着刀片间隙变形,使茎秆发生劈裂。茎秆梢部直径分布在 $10.4 \sim 12.8\text{ mm}$ 。刀片间隙过大时顶端的玉米茎秆可能从间隙滑走无法被粉碎;间隙太小刀片与茎秆的接触面积增大导致打击时茎秆受到的应力变小,不利于刀片进入茎秆内部,使作业效果变差。因此刀片间隙确定为 10 mm ,可以保证对茎秆的有效打击。

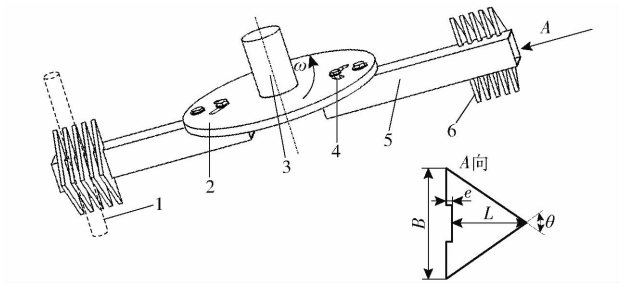


图 1 茎秆粉碎装置结构示意图

Fig. 1 Diagram of chopper

1. 玉米茎秆 2. 固定圆盘 3. 刀轴 4. 弧形孔 5. 刀臂 6. 刀片

1.2 刀片宽度设计

玉米收获机作业时高速旋转的刀片劈裂玉米茎秆,由于要求粉碎后的茎秆段长度小于 100 mm ^[11],刀片宽度 B 应小于 100 mm ,此时刀片对茎秆在轴线方向的打击作用范围小于 100 mm ,茎秆段长度才有可能小于 100 mm 。同时,为了使刀片能够对茎秆内部造成破坏,刀片需要拥有一定长度的打击行程 L 以击穿茎秆,所以刀片宽度不宜过小。刀尖倾角 θ 越大打击行程越短,故以刀尖倾角 120° 为例,若刀片宽度取 80 mm ,通过计算得到打击行程为 20 mm ,此时对于较粗茎秆无法击穿。宽度为 90 mm 时,打击行程 L 为 23 mm (玉米茎秆下部最大直径 23 mm),可以击穿茎秆。因此刀片宽度确定为 90 mm ,且此时不会与割台其他部件发生干涉。

1.3 刀片数量设计

玉米茎秆下部的最大直径为 23 mm 。如图 2 所示,茎秆被夹持于两个拉茎辊缝隙间,图中虚线所示为假想茎秆,为茎秆在夹持过程中左右两边各预留一个直径的距离,防止茎秆发生偏移时刀片无法将其粉碎,故选择沿着刀臂方向安装 5 个间距 10 mm 、厚度 4 mm 的刀片。测量玉米收获机割台下方刀轴的旋转中心到拉茎辊缝隙间的距离为 270 mm ,使刀片排布以拉茎辊的缝隙为对称轴,从而确定刀轴旋

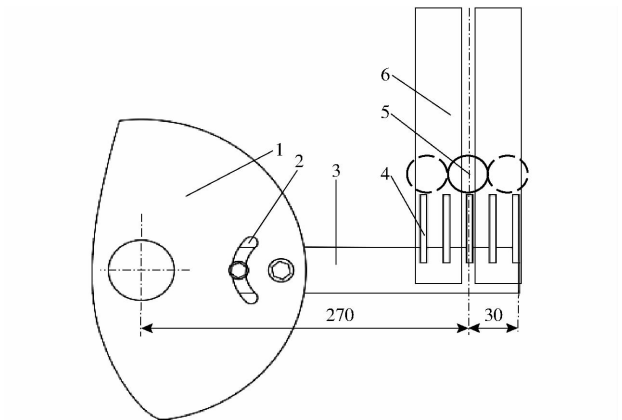


图 2 刀片间距设计示意图

Fig. 2 Diagram of design of blade spacing

1. 固定圆盘 2. 弧形孔 3. 刀臂 4. 刀片 5. 茎秆 6. 拉茎辊

转中心到刀臂末端距离为 300 mm。

2 粉碎过程理论分析

2.1 应力分析

包括玉米在内的大部分农作物的茎秆都属于各向异性材料,即茎秆沿不同方向的力学特性有着显著差别^[12],当打击力沿着茎秆的纤维方向时可以顺势将其劈裂,而垂直于纤维方向的切割则需要将全部的纤维组织切断^[13]。基于玉米生物力学特性,提出一种新的粉碎方式,以期在满足秸秆粉碎长度合格率的同时提高其破碎程度。

在茎秆粉碎装置作业过程中,秸秆受到高速旋转刀片的打击,根据动量定理有

$$Ft = m(v_1 - v_0) \tag{1}$$

其中
$$v_1 = \frac{\pi n R}{30} \tag{2}$$

- 式中 F ——秸秆受到刀片的打击力,N
 t ——打击作用时间,s
 m ——玉米秸秆质量,kg
 v_1 ——刀片刀尖线速度,m/s
 v_0 ——玉米秸秆受到打击前的速度,m/s
 n ——刀轴转速,r/min
 R ——刀尖到旋转中心的距离,m

图 3 中, α 为刀片方向 u 与打击力 F 之间的夹角; β 为刀臂安装角。玉米茎秆属于粘弹性材料,在受力时立即出现弹性变形。刀片在茎秆发生局部变形后与其接触面积增大。茎秆粉碎装置对茎秆的相对速度一定时,由公式(1)得出打击力与打击作用时间成反比,打击作用时间与茎秆的硬度相关^[14],硬度越大,打击作用时间越短^[15],进而打击力越大。

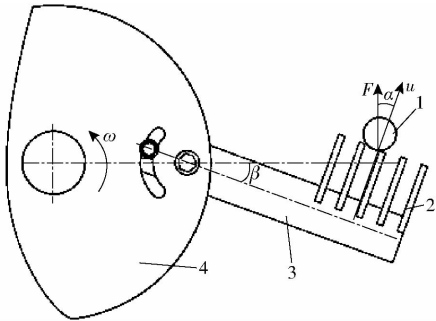


图 3 茎秆粉碎分析示意图

Fig.3 Analysis diagram of stalk chopping

1. 茎秆 2. 刀片 3. 刀臂 4. 固定圆盘

在刀片对茎秆的打击过程中, v_1 保持恒定,有

$$l = v_1 t \tag{3}$$

式中 l ——刀片打击深度,m

假设冲击载荷全部作用在茎秆上,引起茎秆断裂的临界条件为

$$F \geq \sigma_s A \tag{4}$$

式中 σ_s ——茎秆发生断裂的极限应力,Pa
 A ——茎秆与刀片的作用面积,m²

如图 3 所示,忽略刀片与茎秆接触面的曲率,茎秆打击处的作用面积为

$$A = 2ld \frac{\tan \frac{\theta}{2}}{\cos \alpha} \tag{5}$$

式中 d ——刀片厚度,m

玉米茎秆与刀片所接触的平面平行于刀臂 0° 安装时所在平面,通过几何关系可知,刀臂安装角 β 等于 α 。

综合公式(1)~(5)得茎秆断裂的临界条件为

$$\frac{F}{A} = \sigma = \frac{m(\pi n R - 30 v_0) \cos \beta}{2 d \pi n R t^2 \tan \frac{\theta}{2}} \geq \sigma_s \tag{6}$$

式中 σ ——冲击应力,Pa

公式(6)表明,茎秆在刀片打击下发生断裂,主要与刀轴转速 n 、刀尖到旋转中心的距离 R 、刀臂安装角 β 的余弦值成正比,与刀片厚度 d 、刀尖倾角 θ 成反比。

2.2 茎秆粉碎长度

粉碎后的茎秆段理论长度 L_0 可表示为^[16]

$$L_0 = \frac{2 \pi n_0 r}{nz} \tag{7}$$

- 式中 r ——拉茎辊半径,m
 n_0 ——拉茎辊转速,r/min
 z ——圆周方向刀臂数量

公式(7)表明,茎秆段的理论长度与拉茎辊转速 n_0 、拉茎辊半径 r 成正比,与刀轴转速 n 、圆周方向的刀臂数量 z 成反比。将各项参数代入式(7)得 $L_0 = 88 \text{ mm} < 100 \text{ mm}$,满足茎秆粉碎长度要求。根据文献[17],玉米收获机的机器前进速度通过影响茎秆的喂入量对茎秆粉碎长度造成影响,在机器前进速度为 5 km/h 时,茎秆粉碎长度的理论值与实际值最相近。

3 试验与结果分析

3.1 试验材料

玉米茎秆取自东北农业大学试验田,品种为德美亚 2 号。随机选取待收获无倒伏、无病虫害的茎秆,玉米茎秆的直径 17 ~ 23 mm,自然高度 2 400 ~ 2 700 mm,取回后及时完成试验。

3.2 试验台架

茎秆粉碎试验台架主要由机架总成、茎秆粉碎装置、喂入机构和刀轴驱动机构等组成,如图 4 所

示,该台架结构简单,可方便调节刀轴转速、链轮转速、刀臂安装角等。

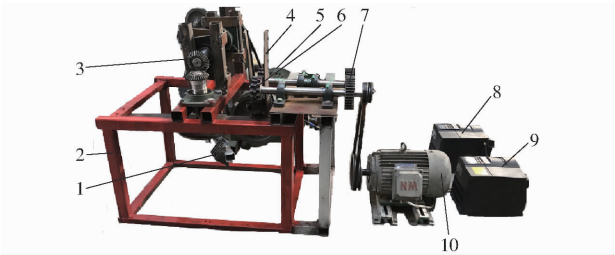


图 4 台架实物图
Fig.4 Chopping test bench

1. 茎秆粉碎装置 2. 机架总成 3. 锥齿轮 4. 茎秆喂入护板
5、10. 电机 6. 链轮 7. 直齿轮 8、9. 变频器

3.3 试验因素

茎秆的破碎效果受多方面因素影响,如茎秆的物理特性、茎秆粉碎装置的作业参数和结构参数等。茎秆的物理特性中,含水率对切割的力学特性有影响^[18],因此,为探究砍劈式茎秆粉碎装置对收获期内不同含水率玉米茎秆的粉碎效果,在玉米收获期内每隔 3 d 选取玉米茎秆进行单因素试验^[19]。

根据理论分析,茎秆粉碎装置的结构参数对茎秆的粉碎效果有影响。刀臂安装角不同使得刀片对茎秆的打击方向不同进而影响粉碎效果。茎秆的外皮与内穗的机械强度差异较大,外皮机械强度高,内穗较低,刀尖的尖锐程度(倾角)对茎秆外皮的穿透能力亦不相同^[20],不同的刀尖倾角对茎秆的破坏作用亦不相同,因此选取不同的安装角和刀尖倾角进行试验,刀尖倾角依照锐角、直角、钝角分别取 60°、90°和 120°。安装角的定义方式如图 5 所示。

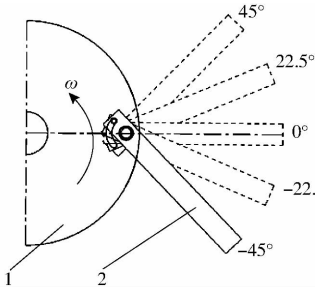


图 5 刀臂安装角示意图
Fig.5 Diagram of fixed angle of chopper
1. 固定圆盘 2. 刀臂

茎秆粉碎装置的作业参数选择:通过对玉米联合收获机刀轴转速与拉茎辊转速的测量,刀轴转速与拉茎辊转速的比值恒定为 1.1,因此试验过程中保持两者转速比值不变^[21]。由于玉米茎秆粉碎时刀端线速度在 30 m/s 以上时能达到比较好的粉碎效果^[11],根据茎秆粉碎装置的旋转中心到最外端刀片距离,可计算得此时刀轴转速需达到 950 r/min,因此选取转速范围为 800 ~ 1 100 r/min。

3.4 试验方法

试验时,根据试验方案调整各试验因素,链轮转速根据刀轴转速的变化作相应调整,依次开启控制刀轴转速和链轮转速的变频器,待茎秆粉碎装置和喂入装置稳定运转后将茎秆投入茎秆喂入护板,再将粉碎后的秸秆段收集、统计,并通过干燥法测量茎秆的含水率。

采用秸秆粉碎长度合格率 y_1 、秸秆破碎率 y_2 作为评价指标,分别从茎秆的轴向和径向两个尺度评价粉碎效果。计算公式分别为

$$y_1 = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \tag{8}$$

$$y_2 = \frac{m_3}{m_1} \times 100\% \tag{9}$$

- 式中 m_1 ——秸秆粉碎前质量,g
 m_2 ——秸秆粉碎后长度小于 100 mm 的秸秆段质量,g
 m_3 ——秸秆粉碎后几何宽度小于 10 mm 的秸秆段质量,g

3.5 单因素试验

3.5.1 茎秆含水率对粉碎效果的影响

设定刀轴转速 950 r/min,安装角 0°,刀尖倾角 90°,分析含水率对粉碎效果的影响,试验结果如图 6。

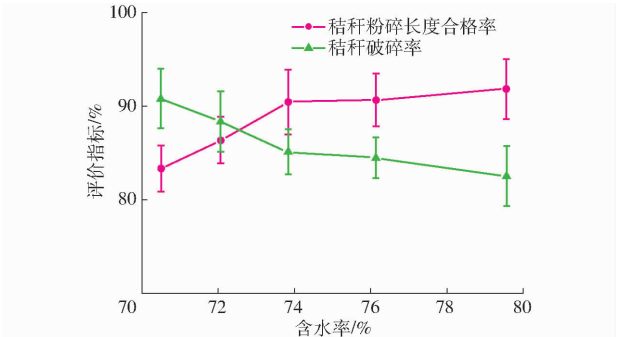


图 6 茎秆含水率对粉碎效果的影响
Fig.6 Effect of moisture content on indexes of maize stalk

收获期内随着玉米收获时间的推移,茎秆含水率下降。收获初期玉米茎秆含水率为 79.56%,与末期差为 9.07%。茎秆含水率越低,其干物质含量就越高,致使其韧性、硬度增加,使得剪切强度也呈增加的趋势^[22-23],致使在粉碎过程中打击茎秆时的阻力变大,因而随着含水率的降低,秸秆的粉碎长度合格率也呈下降的趋势。根据文献[24],弹性模量是玉米秸秆机械特性的关键指标,随着含水率降低,弹性模量变大,玉米秸秆的弹性下降,内聚力减小,玉米秸秆更容易破碎,因而秸秆破碎率上升。

3.5.2 刀臂安装角对粉碎效果的影响

刀臂以不同的角度安装会影响粉碎过程中刀片

对茎秆的打击角度,选取安装角在 $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 的 5 个水平进行单因素试验,刀轴转速为 950 r/min ,刀尖倾角为 90° ,通过干燥法测量茎秆含水率为 $75.27\% \sim 76.55\%$ 。试验结果如图 7 所示。

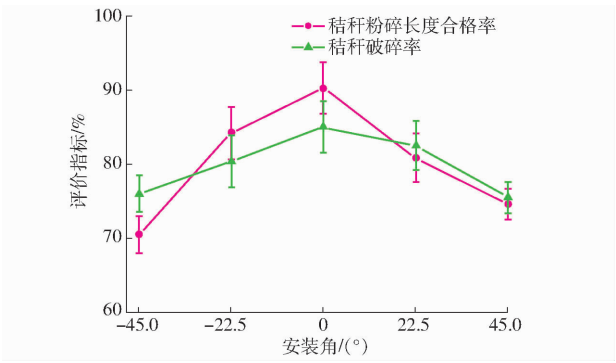


图 7 安装角对粉碎效果的影响

Fig. 7 Effect of fixed angle of knife on indexes of maize stalk

试验结果表明,秸秆的粉碎长度合格率随安装角的增加先提高后降低,在安装角为 0° 时达最大值,比 -45° 时的最低值增加了 27.9% 。秸秆破碎率随着安装角的增加先提高后降低,安装角 0° 时的秸秆破碎率比 45° 时的最低值高 12.6% ,这表明在对茎秆的粉碎作业过程中,刀片垂直打击茎秆是较为有效的打击角度,这是因为当刀片垂直打击茎秆时,有效的作用面积最小,冲击应力最大,因此造成秸秆的粉碎长度合格率和破碎率在刀片垂直打击茎秆时达到最大值,与理论分析结果基本一致。

3.5.3 刀尖倾角对粉碎效果的影响

在刀片对茎秆的打击过程中,不同的刀尖倾角对茎秆的粉碎效果也不同,为此选取刀片倾角为 60° 、 90° 、 120° 进行单因素试验探究其影响规律,安装角和刀轴转速分别固定在 0° 和 950 r/min ,通过干燥法测量茎秆含水率为 $75.27\% \sim 76.55\%$ 。试验结果如图 8 所示。

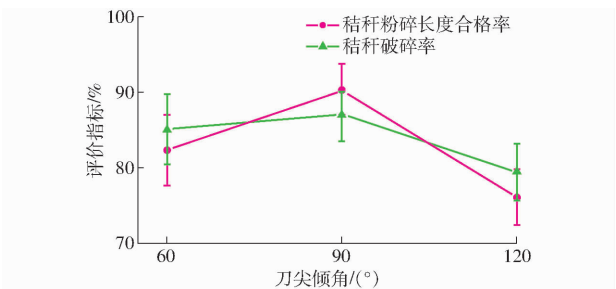


图 8 刀尖倾角对粉碎效果的影响

Fig. 8 Effect of tip angle of blade on indexes of maize stalk

试验结果表明,秸秆的粉碎长度合格率和破碎率均随着刀尖倾角的增加先增大后减小,且刀尖倾角为 60° 时秸秆粉碎长度合格率与破碎率均比 120° 时高。刀尖倾角 90° 时秸秆的粉碎长度合格率和破碎率比 120° 时分别增加了 18.5% 和

9.6% 。这是由于不同的刀尖倾角在破坏茎秆表皮时难易程度不同。玉米茎秆表皮的强度比内部纤维高得多,刀尖越尖锐越容易对茎秆表皮造成破坏,但同时也降低了刀片对茎秆整体的有效破坏面积,使茎秆的破坏程度下降。刀尖倾角在低水平时,刀片对茎秆整体的有效破坏面积低是影响粉碎效果的主要原因。高水平时,刀尖对茎秆表皮的破坏程度低是影响粉碎效果的主要原因,且刀尖倾角 60° 时的粉碎效果比 120° 时好,说明茎秆表皮的破坏比茎秆整体的有效破坏面积对粉碎效果更具影响力。因而,秸秆的粉碎长度合格率与破碎率均呈现先提高后降低的趋势。

3.5.4 刀轴转速对粉碎效果的影响

设定安装角 0° 、刀尖倾角 90° ,通过干燥法测量茎秆含水率为 $75.27\% \sim 76.55\%$,刀轴转速在 $800 \sim 1\,100\text{ r/min}$ 范围内等间隔选取 7 个水平进行单因素试验。试验结果如图 9 所示。

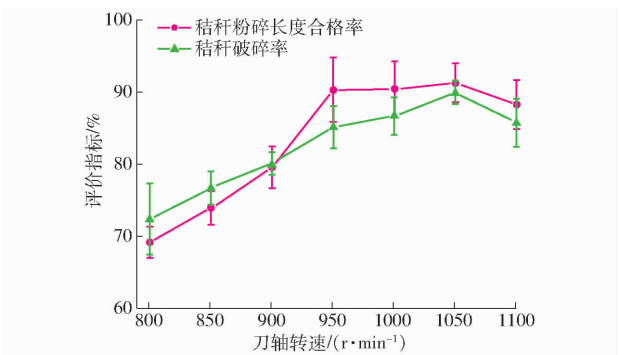


图 9 刀轴转速对粉碎效果的影响

Fig. 9 Effect of rotational speed of shaft of chopper on indexes of maize stalk

试验结果表明,随着刀轴转速增加,秸秆的粉碎长度合格率呈现先增加后平稳变化的趋势,但当刀轴转速达到 $1\,100\text{ r/min}$ 时,秸秆粉碎长度合格率略有下降。秸秆破碎率呈现先增加后略微减小的趋势。刀轴转速对秸秆破碎率有显著影响,刀轴转速在 $800 \sim 950\text{ r/min}$,对秸秆粉碎长度合格率影响显著,刀轴转速 $1\,050\text{ r/min}$ 时秸秆的粉碎长度合格率比 800 r/min 时高 31.9% 。刀轴转速 $1\,050\text{ r/min}$ 时的秸秆破碎率比 800 r/min 时高 24.2% 。这是因为玉米茎秆属于粘弹性体,刀片以较低的速度打击茎秆会产生较大的压缩变形,速度越大传递变形的时间越短,故刀轴转速增加使茎秆所受打击力变大,故起初秸秆粉碎长度合格率与秸秆破碎率均呈上升趋势,随着刀轴转速继续增加,刀片对打击点传递变形的时间不再显著变化,变形量变化同样不明显,秸秆粉碎长度合格率呈现稳定变化的趋势,但刀轴转速的增加更容易打破内部纤维之间的粘聚效果,易于

将茎秆撕裂^[15],故秸秆破碎率仍然呈现上升趋势。但由于刀轴转速增加的同时链轮转速也在增加,对有效打击次数造成影响,使得秸秆粉碎长度合格率和破碎率在刀轴转速达到 1 100 r/min 时略微降低。

3.6 多因素试验

3.6.1 试验设计

为优化茎秆粉碎装置的作业与结构参数,采用 Design-Expert 8.0.6 软件中的二次正交旋转组合试验设计方法进行试验^[25]。依据单因素试验结果,确定刀轴转速、安装角、刀尖倾角为试验因素,以秸秆粉碎长度合格率和秸秆破碎率为评价指标,通过干燥法测量茎秆含水率为 75.27% ~ 76.55%,结合单因素试验的结果选定的各因素编码见表 1,每组试验重复 5 次,取平均值作为试验结果。试验方案与结果见表 2。

表 1 试验因素编码

Tab.1 Coding of factors

编码	因素		
	刀轴转速	安装角	刀尖倾角
	$x_1/(r \cdot \min^{-1})$	$x_2/(^{\circ})$	$x_3/(^{\circ})$
-1.682	900.0	-45.0	60.0
-1	940.5	-26.8	72.2
0	1 000.0	0	90.0
1	1 059.5	26.8	107.8
1.682	1 100.0	45.0	120.0

3.6.2 试验结果分析

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对表 2 的数据进行多元线性回归拟合,剔除不显著因素,得到秸秆粉碎长度合格率 y_1 和秸秆破碎率 y_2 的回归方程,并进行显著性检验。

(1) 秸秆粉碎长度合格率回归模型与响应曲面分析

对秸秆粉碎长度合格率进行方差分析,试验模型显著($p < 0.01$),失拟项不显著($p > 0.05$),说明所得的回归数学模型拟合精度较高。通过比较 p 值判断模型中各因素显著程度,模型中因素 X_1 、 X_1X_3 、 X_1^2 、 X_3^2 为极显著项($p < 0.01$), X_2 、 X_3 为显著项($p < 0.05$),其他各项不显著($p > 0.05$)。各因素对秸秆粉碎长度合格率的影响程度从大到小依次为: X_1 、 X_3 、 X_2 。将不显著项剔除,得到各因素对秸秆粉碎长度合格率 y_1 的回归方程为

$$y_1 = 88.75 + 3.92X_1 + 0.69X_2 + 0.7X_3 - 2.32X_1X_3 - 2.11X_1^2 - 3.66X_3^2$$

(10)

因交互项 X_1X_3 对秸秆粉碎长度合格率的影响显著,取交互项 X_1X_3 对秸秆粉碎长度合格率进行分析。如图 10a 所示,当安装角为 0° 时,刀尖倾角一

表 2 试验方案与结果

Tab.2 Results of response surface experiment

序号	X_1	X_2	X_3	$y_1/\%$	$y_2/\%$
1	-1	-1	-1	75.73	70.31
2	1	-1	-1	88.64	82.04
3	-1	1	-1	78.75	73.43
4	1	1	-1	90.43	85.57
5	-1	-1	1	81.88	77.02
6	1	-1	1	86.81	75.69
7	-1	1	1	84.58	85.01
8	1	1	1	85.68	78.90
9	-1.682	0	0	75.14	78.57
10	1.682	0	0	88.76	83.95
11	0	-1.682	0	88.44	78.89
12	0	1.682	0	90.21	83.33
13	0	0	-1.682	76.31	70.38
14	0	0	1.682	78.81	77.70
15	0	0	0	88.82	81.26
16	0	0	0	89.66	82.69
17	0	0	0	88.57	83.22
18	0	0	0	89.52	82.46
19	0	0	0	89.11	83.56
20	0	0	0	88.28	79.72
21	0	0	0	89.19	83.52
22	0	0	0	88.79	84.52
23	0	0	0	87.12	82.69

定的情况下,随刀轴转速增加,秸秆粉碎长度合格率提高,这是因为随着刀轴转速增加,刀片对茎秆在单位时间内的打击次数增多,且打击力提高,进而降低了秸秆段的长度。在刀轴转速一定的条件下,随着刀尖倾角的增加,秸秆粉碎长度合格率呈先上升后下降的趋势。这是因为刀尖倾角决定了刀片打击茎秆时进入茎秆内部的难易程度,刀尖越尖锐,刀片越容易击穿茎秆表皮,但刀尖倾角小的刀片对茎秆的有效破坏面积也小,对粉碎效果造成了影响,因而刀尖倾角为锐角时,随着刀尖倾角增加秸秆的粉碎长度合格率提高。在刀尖倾角为钝角时,刀尖角度逐渐成为钝角,刀片对茎秆的冲击应力下降,使得秸秆的粉碎长度合格率下降。

(2) 秸秆破碎率回归模型与响应曲面分析

对秸秆破碎率进行方差分析,试验模型显著($p < 0.01$),失拟项不显著($p > 0.05$),说明所得的回归数学模型拟合精度较高。模型因素中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_3 、 X_3^2 为极显著项($p < 0.01$),其他各项不显著。各因素对秸秆破碎率的影响程度从大到小依次为: X_1 、 X_2 、 X_3 。将不显著项剔除,得到各因素对秸秆破碎率 y_2 的回归方程为

$$y_2 = 82.63 + 1.87X_1 + 1.85X_2 + 1.29X_3 - 3.91X_1X_3 - 3.05X_3^2$$

(11)

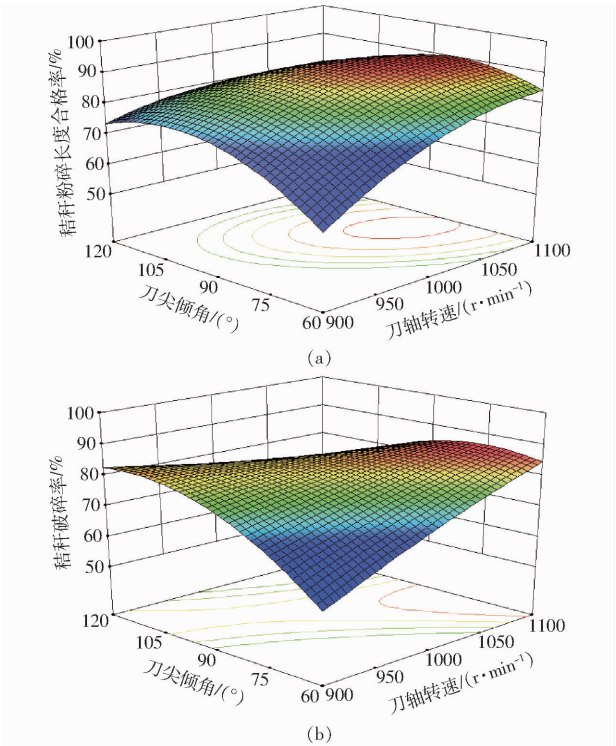


图 10 各因素对评价指标影响的响应曲面
Fig. 10 Response surfaces of influence of various factors on indexes

因交互项 X_1X_3 对秸秆破碎率的影响显著,取交互项 X_1X_3 对秸秆破碎率进行分析。如图 10b 所示,在安装角为 0° ,刀尖倾角为锐角时,秸秆破碎率随刀轴转速的增加而上升。在刀尖倾角为钝角时,随刀轴转速的增加秸秆破碎率先增加后略微减小。这是因为刀尖角度在锐角范围内,对茎秆的击穿作用明显,打击茎秆的冲击应力也大,故刀轴转速的提高可有效增加破碎效果,当刀尖倾角由锐角转钝角时,刀尖对茎秆的击穿效果减弱,所以刀轴转速增加对秸秆破碎率的提高作用下降。在刀轴转速为 $900 \sim 1\,000\text{ r/min}$ 时,秸秆的破碎率随刀尖倾角增大先提高后趋于平缓,在刀轴转速为 $1\,000 \sim 1\,100\text{ r/min}$ 时秸秆破碎率随刀尖倾角的增大先提高后降低。这是因为在刀轴转速处于 $900 \sim 1\,000\text{ r/min}$ 时,增大刀尖倾角有利于提高刀片对茎秆的破坏作用,而刀轴转速为 $1\,000 \sim 1\,100\text{ r/min}$,刀尖倾角为锐角时,随着刀尖倾角的增加对茎秆破坏效果增强,刀尖为钝角时不利于击穿茎秆表皮,故呈现先增大后减小的趋势。

3.7 参数优化与田间验证试验

3.7.1 参数优化

为获得茎秆粉碎装置各因素较优的参数组合,根据粉碎质量要求和实际作业条件选定优化约束条件,利用 Design-Expert 8.0.6 软件的多目标优化算法进行参数优化,目标及约束条件为

$$\begin{cases} \max y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \max y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 900\text{ r/min} \leq x_1 \leq 1\,100\text{ r/min} \\ -45^\circ \leq x_2 \leq 45^\circ \\ 60^\circ \leq x_3 \leq 120^\circ \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

优化结果为:当刀轴转速 $1\,092\text{ r/min}$,安装角 41.37° ,刀尖倾角 82.69° 时,秸秆粉碎长度合格率为 91.28% ,秸秆破碎率为 85.66% 。

3.7.2 田间验证试验

考虑到测量与加工的便利性,对优化结果进行了圆整,将刀轴转速设置为 $1\,090\text{ r/min}$,安装角 41° ,刀尖倾角 83° ,加工砍劈式茎秆粉碎装置并安装到割台下方。刀轴转速的调节过程中利用转速仪测定转速变化,直到转速仪示数变化范围稳定在 $(1\,090 \pm 1)\text{ r/min}$ 。为了验证台架试验的准确性,2019 年 9 月 29 日在黑龙江省北安市赵光农场进行田间试验。玉米的种植模式为大垄双行,垄距 110 cm ,平均株距 26 cm 。按照 GB/T 21961—2008《玉米收获机械试验方法》的规定,试验区分为 20 m 起步提速区、 20 m 测定区、 15 m 停车区,在试验前将起步提速区和停车区的玉米清除。在测定区内玉米收获机作业速度控制在 5 km/h 。试验时玉米茎秆含水率为 $77.66\% \sim 80.40\%$ 。在此条件下重复 5 次试验,并在相同的条件下作业,与现有的甩刀式茎秆粉碎装置作业效果进行比较,两种茎秆粉碎装置的安装如图 11 所示。

试验后作业效果如图 12 所示,从破碎的秸秆段

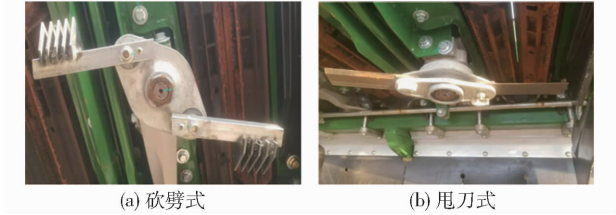


图 11 玉米联合收获机割台茎秆粉碎装置安装图
Fig. 11 Installation of choppers in header of maize combine harvest

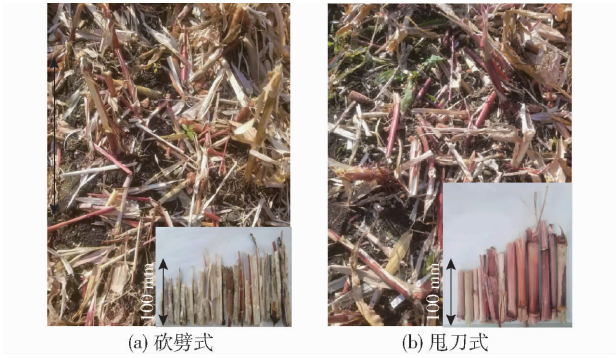


图 12 茎秆粉碎效果

Fig. 12 Effects of stalks chopped by different choppers

形貌来看,砍劈式茎秆粉碎装置作业后茎秆内稃暴露,轴向呈不规则断面,端面呈锯齿状。

玉米收获机作业后,根据 GB/T 24675.6—2009《保护性耕作机械秸秆粉碎还田机》标准要求,每次收获机作业完成后随机选取 10 个面积为 1 m²的测试样区,拾取切碎的秸秆并统计秸秆的长度分布如图 13 所示,其长度分布集中在 80 ~ 90 mm 之间,与理论分析基本一致。秸秆粉碎长度合格率与破碎率试验结果如表 3 所示。

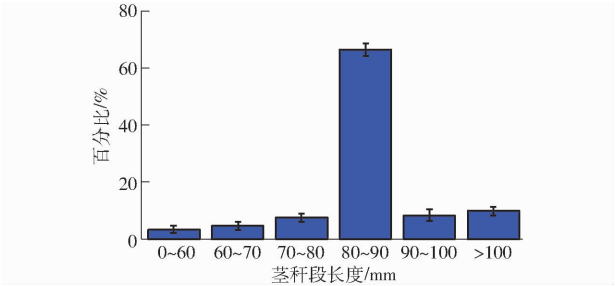


图 13 砍劈式粉碎装置茎秆段长度分布图
Fig. 13 Distribution of length of stalks of chopper

表 3 试验结果
Tab. 3 Results of experiments %

试验 序号	砍劈式茎秆粉碎装置		甩刀式茎秆粉碎装置	
	秸秆粉碎长 度合格率	秸秆 破碎率	秸秆粉碎长 度合格率	秸秆 破碎率
1	91.88	87.30	52.51	15.35
2	88.56	85.52	48.35	13.66
3	92.50	88.23	62.02	9.82
4	89.22	84.31	57.55	17.24
5	88.89	83.52	63.76	10.61
均值	90.21	85.78	56.84	13.34
标准差	1.84	2.23	6.44	3.13

由表 3 可知,砍劈式茎秆粉碎装置作业后秸秆的粉碎长度合格率与破碎率分别为 90.21%、85.78%,与优化结果基本一致。砍劈式茎秆粉碎装置的秸秆粉碎长度合格率和秸秆破碎率分别比甩刀式茎秆粉碎装置高 33.37、72.44 个百分点。

4 结论

(1)基于玉米茎秆的力学特性,提出一种砍劈式茎秆粉碎装置,该装置作业后秸秆的粉碎长度合格率满足国家标准要求。

(2)玉米秸秆粉碎长度合格率随其含水率的降低而下降,秸秆破碎率则上升;随着安装角和刀尖倾角的增大,秸秆的粉碎长度合格率与破碎率均呈先增加后减小的趋势;随刀轴转速增加,秸秆的粉碎长度合格率和破碎率均呈现先增加后略微下降的趋势。

(3)通过多因素试验得出各因素对秸秆粉碎长度合格率的影响程度由大到小依次为:刀轴转速、刀尖倾角、安装角,对秸秆破碎率的影响程度由大到小依次为刀轴转速、安装角、刀尖倾角。

(4)通过优化分析,获得最优参数组合为:刀轴转速 1 090 r/min、安装角 41°、刀尖倾角 83°。田间试验表明,秸秆的粉碎长度合格率和破碎率分别达到 90.21%、85.78%,分别比玉米联合收获机割台下方安装的甩刀式茎秆粉碎装置高 33.37 个百分点和 72.44 个百分点。田间试验验证了理论分析和室内试验的正确性。

参 考 文 献

[1] 王金武,唐汉,王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(5):1-21. WANG Jinwu,TANG Han,WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(5):1-21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170501&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.001. (in Chinese)

[2] IGATHINATHANE C,WOMAC A R,SOKANSAN J S. Corn stalk orientation effect on mechanical cutting[J]. Biosystems Engineering,2010,107(2):97-106.

[3] 章志强,何进,李洪文,等. 可调式秸秆粉碎抛撒还田机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9):76-87. ZHANG Zhiqiang,HE Jin,LI Hongwen,et al. Design and experiment on straw chopper cum spreader with adjustable spreading device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(9):76-87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170910&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.010. (in Chinese)

[4] 郑智旗,何进,李洪文,等. 固定刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):108-115. ZHENG Zhiqi,HE Jin,LI Hongwen,et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(Supp.):108-115. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s017&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.017. (in Chinese)

[5] 王金武,王奇,唐汉,等. 水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):112-117. WANG Jinwu,WANG Qi,TANG Han,et al. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(9):112-117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150916&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.016. (in Chinese)

[6] 张宗玲,韩增德,李晓栋,等. 玉米穗茎兼收割台切碎装置参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):266-274. ZHANG Zongling,HAN Zengde,LI Xiaodong,et al. Optimization of parameters for stalk chopper of corn harvester for reaping both corn stalk and spike[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):266-274.

- http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018s035&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.035. (in Chinese)
- [7] 施印炎,罗伟文,胡志超,等. 全量秸秆粉碎条铺与种带分型清秸装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):58-67. SHI Yinyan, LUO Weiwen, HU Zhichao, et al. Design and test of equipment for straw crushing with strip-laying and seed-belt classification with cleaning under full straw mulching[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(4):58-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190407&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.007. (in Chinese)
- [8] 何进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):1-19. HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(4):1-19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180401&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)
- [9] HAO G, MATHANKER S, MOMIN M A, et al. Effects of three cutting blade designs on energy consumption during mowing-conditioning of *Miscanthus giganteus*[J]. Biomass and Bioenergy, 2018,109:166-171.
- [10] 郑智旗,何进,王庆杰,等. 秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):87-96. ZHENG Zhiqi, HE Jin, WANG Qingjie, et al. Design and experiment on straw pick-chopping and ditch-burying integrated machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(7):87-96. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170711&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.011. (in Chinese)
- [11] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007:294-296.
- [12] 孟海波. 秸秆切割破碎与揉切机刀片耐用性试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2005. MENG Haibo. Experimental study on straw cutting process and wear resistance and strength toughness of cutters[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [13] 王庭杰,张亮,韩琼,等. 玉米茎秆细胞壁和组织构建对抗压强度的影响[J]. 植物科学学报,2015,33(1):109-115. WANG Tingjie, ZHANG Liang, HAN Qiong, et al. Effects of stalk cell wall and tissue on the compressive strength of maize[J]. Plant Science Journal, 2015,33(1):109-115. (in Chinese)
- [14] 王德福,王沫,李利桥. 锤片式粉碎机粉碎玉米秸秆机理分析及参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):165-171. WANG Defu, WANG Mo, LI Liqiao. Mechanism analysis and parameter optimization of hammer mill for corn stalk[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(11):165-171. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171120&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.020. (in Chinese)
- [15] 陈争光,王德福,李利桥,等. 玉米秸秆皮拉伸和剪切特性试验[J]. 农业工程学报,2012,28(21):59-65. CHEN Zhengguang, WANG Defu, LI Liqiao, et al. Experiment on tensile and shearing characteristics of rind of corn stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(21):59-65. (in Chinese)
- [16] 张道林,孙永进,赵洪光,等. 立辊式玉米摘穗与茎秆切碎装置的设计[J]. 农业机械学报,2005,36(7):50-52,76. ZHANG Daolin, SUN Yongjin, ZHAO Hongguang, et al. Design of avertical-roll type of corn picker and stalk chopper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(7):50-52,76. (in Chinese)
- [17] 郝付平,陈志,张宗玲,等. 玉米穗茎联合收获台茎秆切碎输送装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(增刊):67-72. HAO Fuping, CHEN Zhi, ZHANG Zongling, et al. Design and experiment of corn stalk combined harvesting header stalk chopping conveyor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(Supp.):67-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2019s011&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.011. (in Chinese)
- [18] NAZARI G M, JAFARI A, MOHTASEBI S S, et al. Effects of moisture content and level in the crop on the engineering properties of alfalfa stems[J]. Biosystems Engineering, 2008,101(2):199-208.
- [19] 张燕青,崔清亮,郭玉明,等. 谷子茎秆切割力学特性试验与分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):146-155,162. ZHANG Yanqing, CUI Qingliang, GUO Yuming, et al. Experiment and analysis of cutting mechanical properties of millet stem[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(4):146-155,162. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190416&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.016. (in Chinese)
- [20] MATHANKER S K, GRIFT T E, HANSEN A C. Effect of blade oblique angle and cutting speed on cutting energy for energycane stems[J]. Biosystems Engineering, 2015,133:64-70.
- [21] 张宗玲. 新型玉米穗茎联合收获机割台的研制[D]. 北京:中国农业大学,2018. ZHANG Zongling. Study on a new corn combine harvester header for reaping both corn stalk and spike[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [22] 胡良龙,王公仆,凌小燕,等. 甘薯收获期藤蔓茎秆的机械特性[J]. 农业工程学报,2015,31(9):45-49. HU Lianglong, WANG Gongpu, LING Xiaoyan, et al. Mechanical properties of sweet potato vine and stalk during harvest[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(9):45-49. (in Chinese)
- [23] IGATHINATHANE C, WOMAC R A, SOKHANSAN J S, et al. Size reduction of high- and low-moisture corn stalks by linear knife grid system[J]. Biomass and Bioenergy, 2009,33(4):547-557.
- [24] 王春芳,毛明,泮进明,等. 玉米秸秆取样条件对其弹性模量的影响研究[J]. 农业工程,2012,2(1):48-53. WANG Chunfang, MAO Ming, PAN Jinming, et al. Study of sampling conditions on the elastic modulus of corn straw[J]. Agricultural Engineering, 2012,2(1):48-53. (in Chinese)
- [25] 任德志,白雪卫,刘德军,等. 玉米秸秆皮瓢分离碾压揭皮辊设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(1):93-99. REN Dezhi, BAI Xuewei, LIU Dejun, et al. Design and test on roller-teeth husking roller in rind-pith separation of corn stalks[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(1):93-99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180111&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.011. (in Chinese)